



NanoTerasu

ナノテラスの概要（施設紹介と従事者管理）



国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（QST）

量子技術基盤研究部門

次世代放射光施設整備開発センター

萩原 雅之

1.1 施設愛称 NanoTerasu

公募により決定 NanoTerasu (ナノテラス)

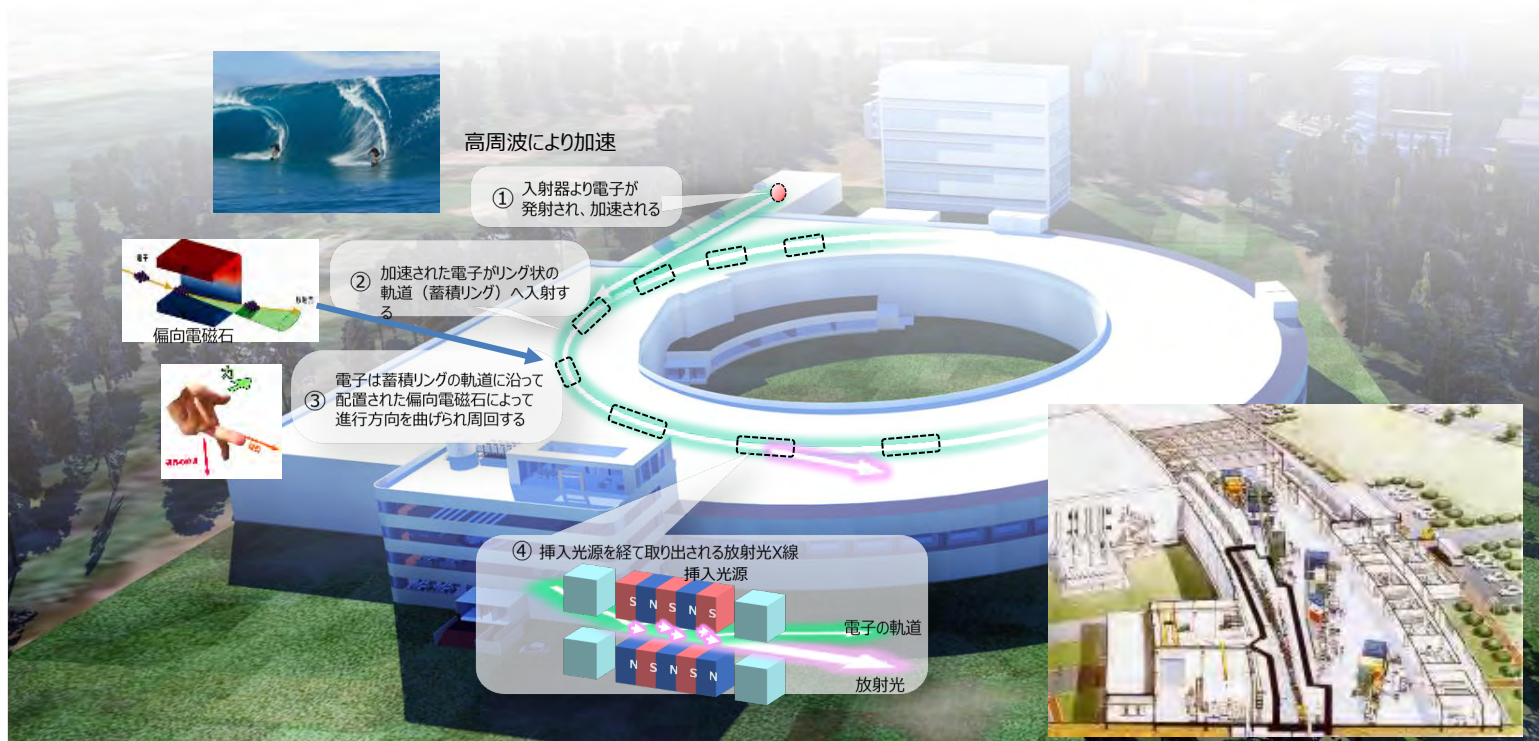
「**ナノ (10億分の1) の世界**」の世界を明るく照らす放射光によって
「**天照大御神**」のように、世界の学術や産業に豊かな実りをもたらして欲しい
という願いが込められている。



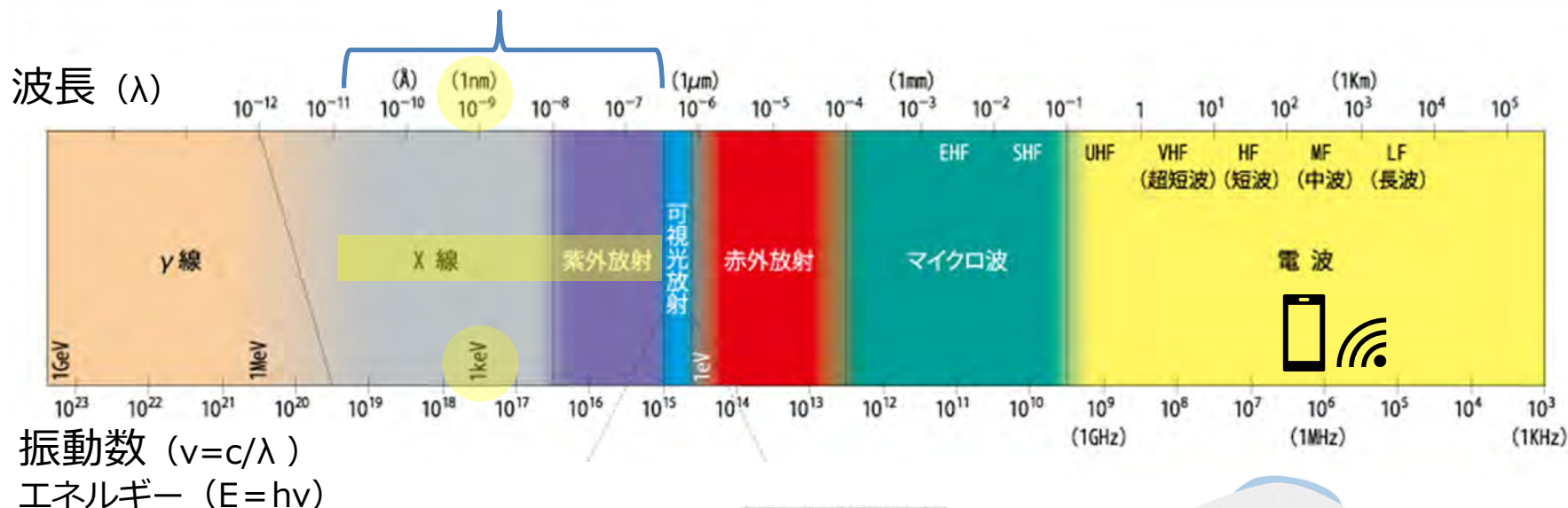
天岩戸神話の天照大御神
(春齋年昌画、1887年)

1.2 放射光の特長

- 強度が高い（光子の数）
- 輝度が高い（光の拡がり方が小さい、低エミッタンス）
- 位相が揃っている成分多い（高コヒーレンス）



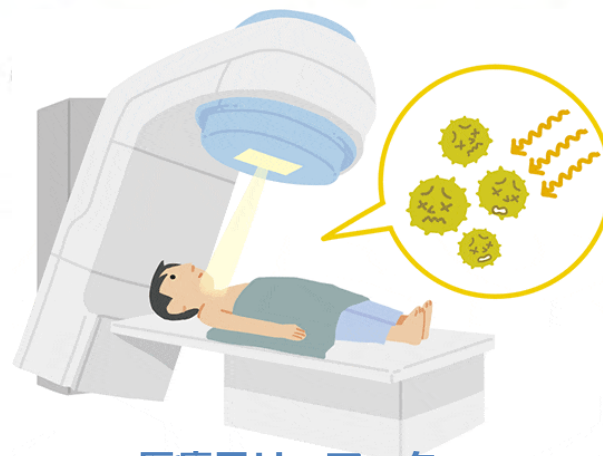
放射光の波長範囲「ナノの世界」
（光のエネルギーとしては紫外～X線領域）が
研究や観察の主な対象



放射光施設で扱うX線の
エネルギーは
身近なX線発生装置と同等か
それ以下



手荷物検査装置

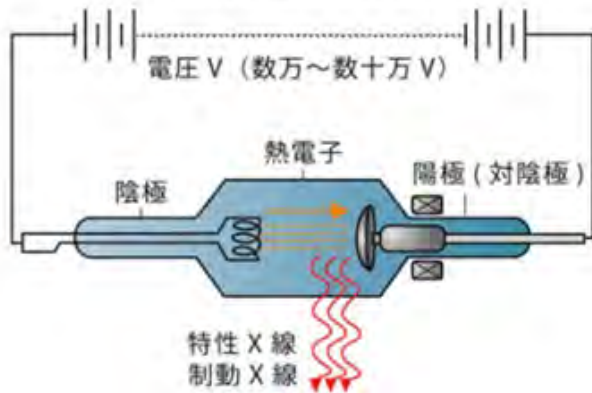


医療用リニアック

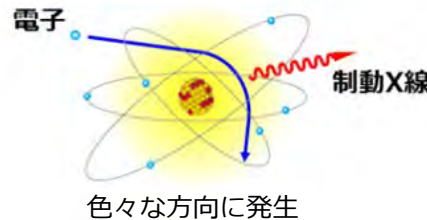
身近なX線発生装置

高速の電子を標的に打ち込み、標的中の原子核の電場によって進行方向を曲げられた際に放射される光を利用

X線発生装置の構造図



制動X線

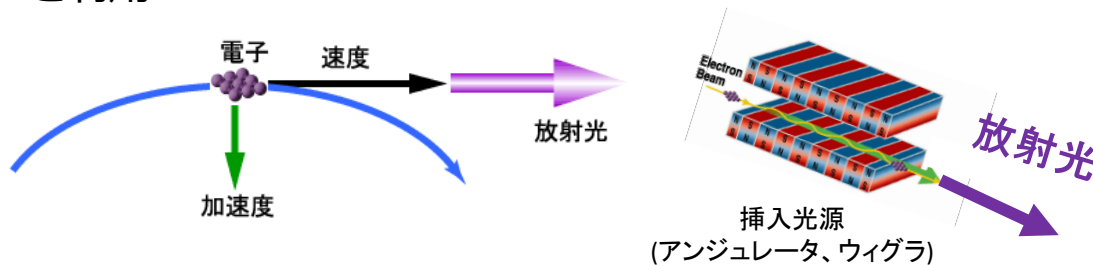


身近なX線発生装置で生成するX線のイメージ



放射光 (Synchrotron radiation) 施設

光速に近い速さ（～GeV）で周回する電子を磁場によって曲げて、電子の進行方向に放射される光を利用



放射光施設で生成するX線のイメージ



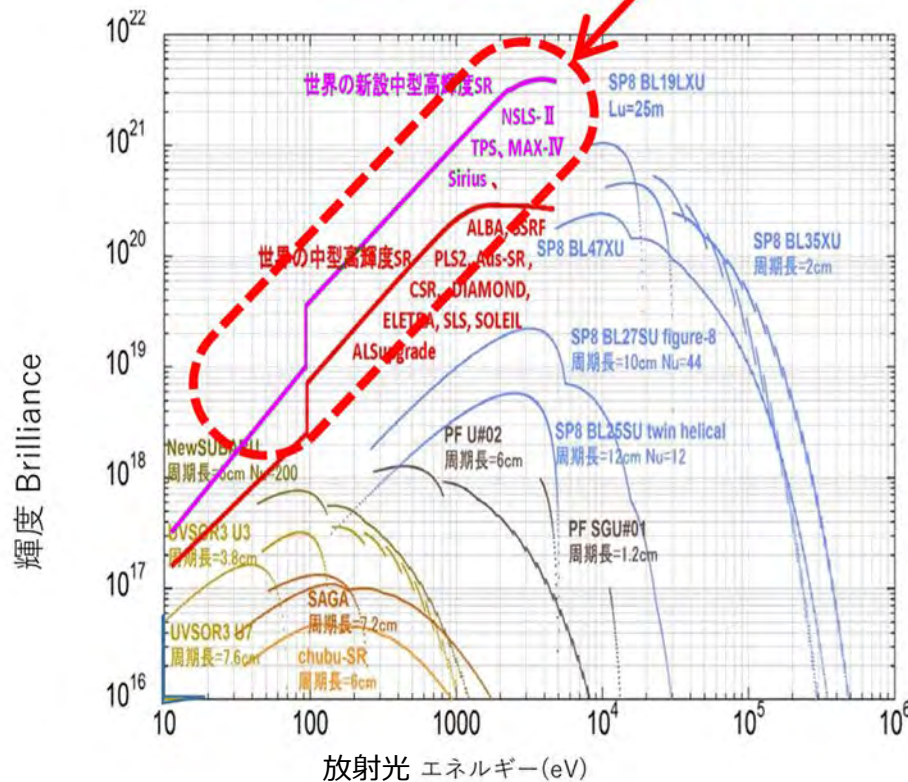
光の密度が高い・・・高強度
光の拡がり方が小さい・・・高輝度

微小領域を明るく照らす

⇒ 輝度 Brilliance

「光子数/(秒・ $\text{mm}^2(\text{mrad})^2 \cdot 0.1\%$
バンド幅)」

現在、日本はこの領域で遅れを取っている



ビームの径が小さく方向がそろっている

低エミッタンス光源 MBA*の蓄積リング

(*Multi-bend achromat: 偏向電磁石の数を多くすることで、電子ビームの広がりを小さく抑え、高い輝度とコンパクト性を兼ね備える設計)

エミッタンス10nm・rad以下の高輝度放射光施設の建設または運用開始年次推移

年	リング	エネルギー (GeV)	国
1992	ESRF	6	フランス
//	ALS	1.5 - 1.9	米国
1994	ELETTRA	2.4	イタリア
//	MAX-II	1.5	スウェーデン
1996	APS	7	米国
1997	SPring-8	8	日本
1998	BESSY-II	1.9	ドイツ
2000	SLS	2.4	スイス
2004	SPEAR-3	3	米国
2006	SOLEIL	2.8	フランス
//	DIAMOND	3	イギリス
//	ASP	3	オーストラリア
2008	SSRF	3.4	中国
2009	PETRA-III	6	ドイツ
2011	ALBA	3	スペイン
2012	PLS-II	3	韓国
2015	NSLS-II	3	米国
2016	MAX-IV	3	スウェーデン



NanoTerasuでの放射光生成

1. 全長110mの線型加速器（ライナック）によって電子を3 GeVに加速
2. 蓄積リング（シンクロトロン）で電子を蓄積
3. 挿入光源によって生成した放射光を実験ホールに取り出して利用

性能	PF (KEK)
加速エネルギー	2.5 GeV
入射器出力	65 W
蓄積電流	800 mA

(1) 直線加速装置 (ライナック)

加速粒子：電子

最大エネルギー 3.5 GeV (定常運転 **3 GeV**)

最大出力 **1.2 W** (0.4 nC/pulse 1 Hz) → ビームダンプへ
 1×10^{15} e/3月 → 蓄積リングへ

--- 使用の目的 ---

蓄積リング用入射器、加速器科学・放射線防護に係る研究

(2) シンクロトロン (蓄積リング)

最大エネルギー 3.5 GeV (定常運転 **3 GeV**)

最大蓄積電子数 3×10^{12} electrons (481 nC): 毎秒 8×10^5 周回

蓄積電流 **413 mA** ライナックから継ぎ足し入射 (Top-Up運転)

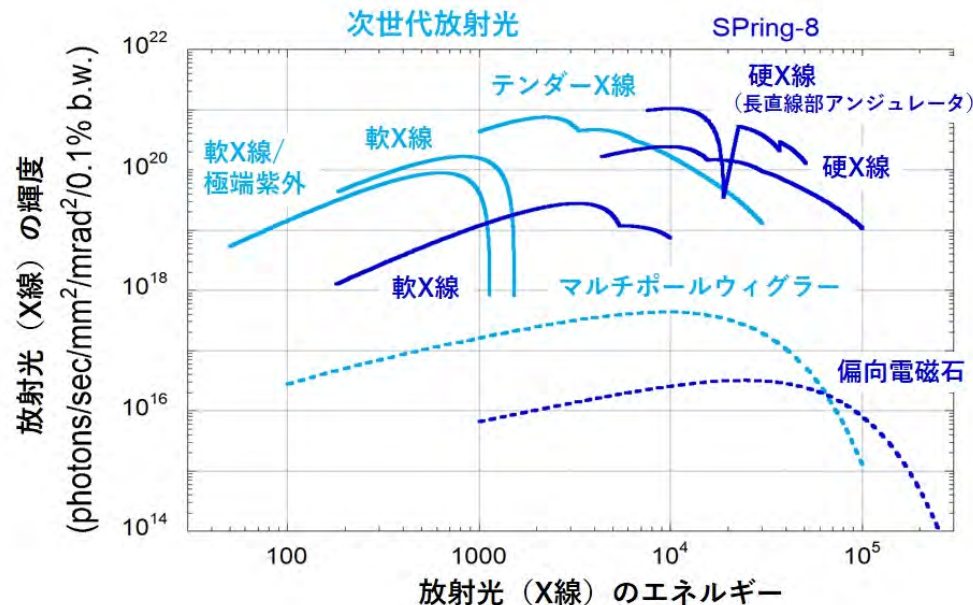
--- 使用の目的 ---

電子ビームの蓄積、

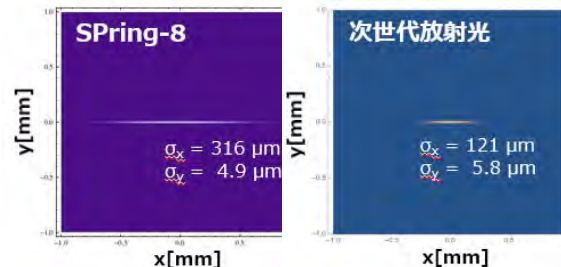
放射光 (エックス線) の供給及び利用に関する研究・開発、

加速器科学・放射線防護に係る研究、放射光利用に関する啓蒙活動

- ✓ 軟X線領域に主眼を置いた次世代高輝度放射光を周長350 m以下のコンパクトサイズで実現
- ✓ 輝度だけでなく、安定度・信頼度を重視した光源を高いコストパフォーマンスで実現



電子ビームサイズの比較



蓄積リング周長: 349m
線型加速器全長: 110m



	次世代放射光施設		SPring-8
	小委員会報告書	設計	
加速器エネルギー	3 GeV	2.998 GeV	8 GeV
蓄積電流	400~600 mA	400 mA	100 mA
リング周長	325~425m 程度	348.8 m	1436 m
セル数		16	44
エミッタンス	1 nmrad 程度	1.14 nmrad	2.4 nmrad
消費電力		5 MW	40 MW
最大ビームライン数	25 本程度	28 本	63 本

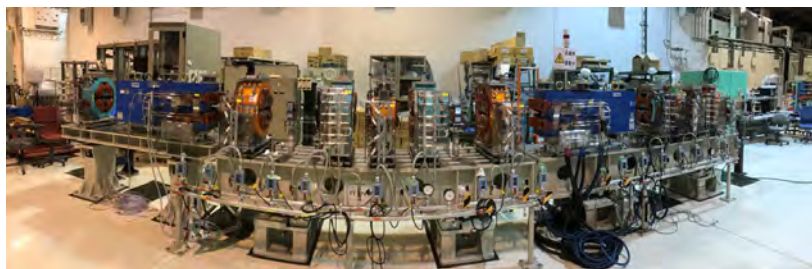
加速器主要パラメータ

Undulator : 14
Multi-Pole Wiggler : 14

SPring-8との施設のサイズの比較



2.3.1 NanoTerasuの加速器構成



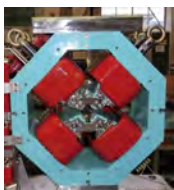
蓄積リング磁石セル (ハーフセル)



偏向電磁石



六極電磁石



四極電磁石

 $4 \times 16 = 64$ 台各 $10 \times 16 = 160$ 台加速管
クライストロン
から高周波出力

線型加速器

蓄積リング
(磁石セル 16セル)
周長349 mTop-up運転
(ライナックからの
継ぎ足し運転)
によって蓄積電流をKeep

蓄積リング用加速器

ビームライン

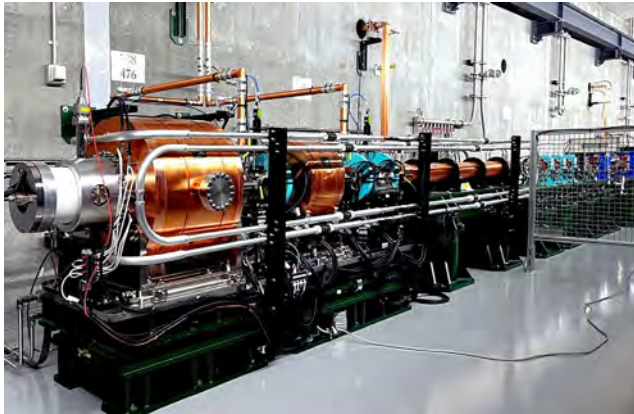
入射部



電子銃



電子銃



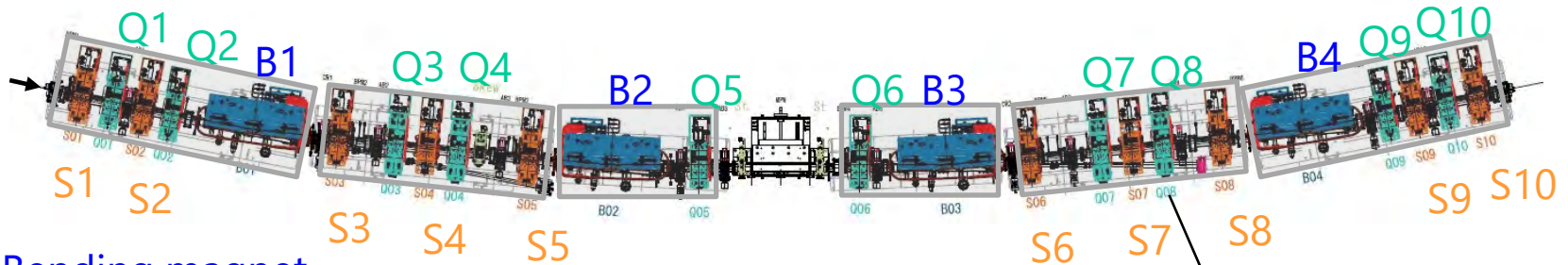
3 GeV C-band (5.7 GHz) 加速器
(40 of 2m長-空洞)



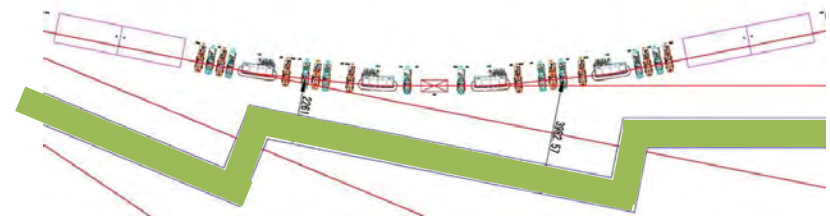
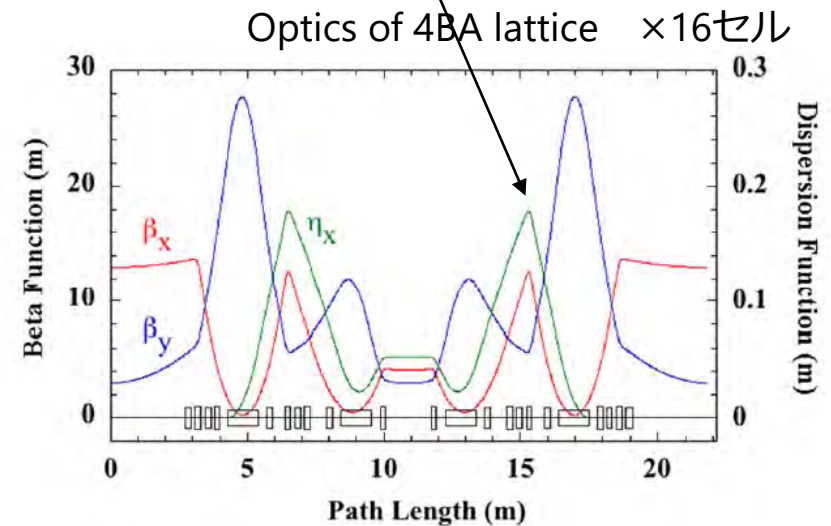
ビームダンプ (1 m² x 2m長)



Parameters		Injector
Beam energy	E (GeV)	3
Normalized emittance	(μmrad)	<10
Emittance at 3 GeV	(nmrad)	<1.7
Bunch charge	(nC)	0.3
Repetition rate (Normal)	(Hz)	1



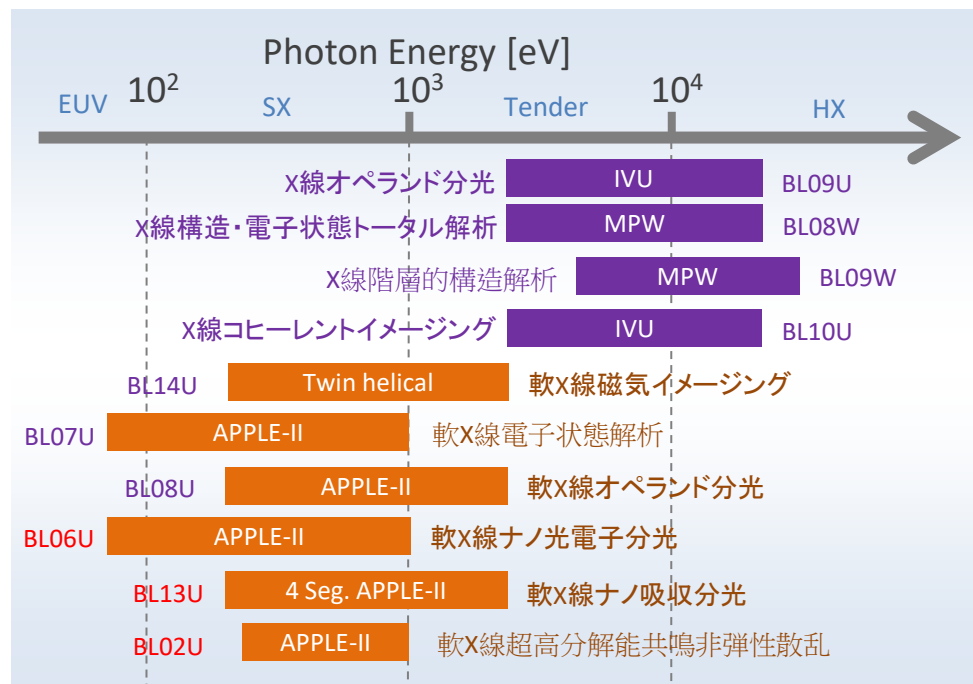
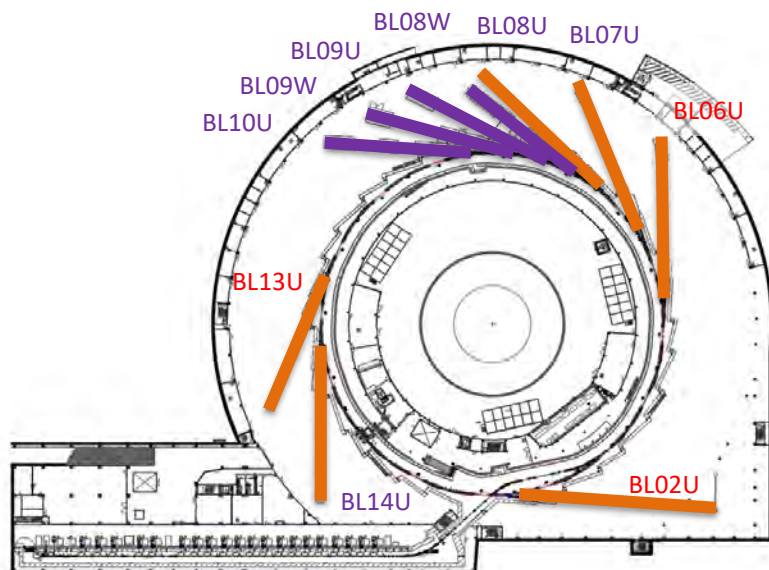
B: Bending magnet
Q: Quadrupole magnet
S: Sextupole magnet



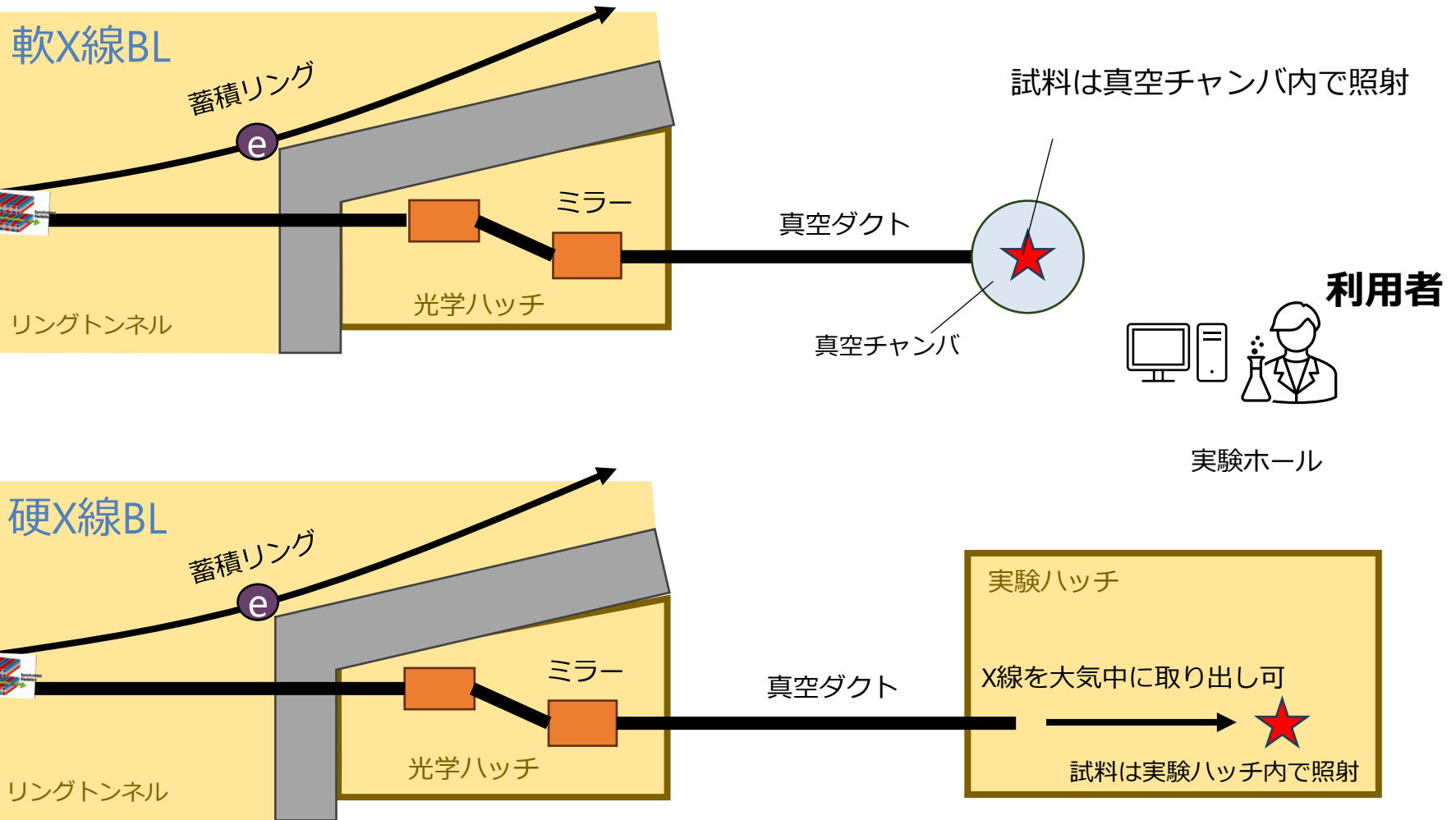
躯体コンクリート (1m厚)

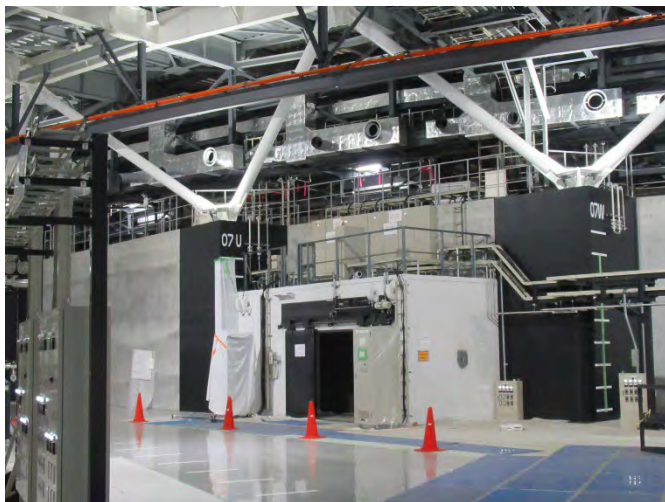
2.4 挿入光源

運用開始時に10本のBLを整備（共用：3、コアリション：7）

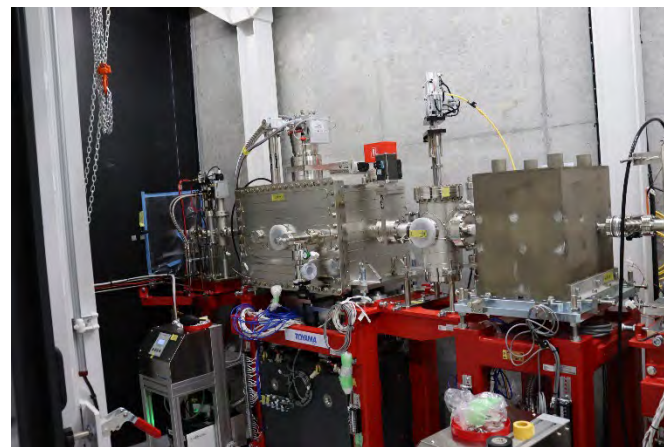


放射光ビームライン（軟X線BL：6、硬X線BL：4）





光学ハッチ



光学ハッチ内部



軟X線ビームライン



実験ハッチ (硬X線ビームライン)



項目	内訳	役割分担
加速器	ライナック、蓄積リング、輸送系、制御・安全	国
ビームライン	共用ビームライン (3本) 課題公募、成果公開に基づき、 共用ビームタイムとして運用	国
	コアリションビームライン (7本) パートナー機関が自主運用 (一部、共用ビームタイムとして運用)	パートナー
用地整備・建屋	土地造成・基本建屋 (交流棟機能含む)	パートナー

- 放射光利用の普及・拡大のさらなる推進
 - 産業分野でのさらなる利活用
 - 学際領域を含む新規ユーザーの開拓
- 「**放射線業務従事者***登録」が産業利用・新規利用の障害
国内9放射光施設でこれまでユーザーの被ばくなし

* 管理区域内において放射性発生装置の取扱いに従事する者（RI規則第一条）

- ① 管理（健康診断、被ばく線量）コストの発生
- ② 登録に要する手間や時間
- ③ 学生の実習や実験参加などの機会の喪失



- 実験ホールの管理区域設定の見直し



NanoTerasu基本方針：放射線業務従事者でなくても、可能な限り放射光実験に参加できるものとする。

表1 国外の放射光施設における放射線管理状況¹⁾

区分	施設名
管理区域	SOLARIS(ポーランド), BESSY-II (独)*, CLS (加), CHESS (米), SLRI (タイ), INDUS-1/2 (印) <u>既存の国内放射光施設(日本)</u>
非管理区域	ESRF(仏), MAX-IV (スウェーデン), Elettra(伊), ALBA(スペイン), ANKA(独), PETRA III(独), DIAMOND(英), SOLEIL(仏), SLS(スイス), APS(米), ALS(米), NSLS-II (米), SPEAR-III(米), UVX(ブラジル), <i>Sirius</i> (ブラジル), TLS (台), TPS (台), PLS-II (韓), SSLS(シンガポール), AS(豪), SESAME(ヨルダン) European FEL(独), LCLS(米)
不明	CAMD (米), SSRF (中), BSRF(中), NSRL (中)

赤字

線量計の着用を求めている施設

*

top-upとクライオU導入に依る試験期間中の措置。

1) 野村昌治, "放射光施設の放射線管理",
放射光 March 2019 Vol.32 No.2 pp.122-125

電子ビーム入射時の実験ホールの空間線量増加、煩雑な入退管理を懸念

- 核燃料物質、核原料物質、原子炉及び放射線の定義に関する政令

第4条(放射線)

原子力基本法第3条第5号の放射線は、次に掲げる電磁波又は粒子線とする。

- (1) アルファ線、重陽子線、陽子線その他の重荷電粒子線及びベータ線
- (2) 中性子線
- (3) ガンマ線及び特性エックス線(軌道電子捕獲に伴って発生する特性エックス線に限る。)
- (4) 1メガ電子ボルト以上のエネルギーを有する電子線及びエックス線

⇒ 1 MeV未満のエックス線は電離則での管理対象

● 電離放射線障害防止規則

第四条(放射線業務従事者の被ばく限度)

事業者は、**管理区域内**において放射線業務に従事する労働者(以下「**放射線業務従事者**」という。)の受ける実効線量が5年間に付き100ミリシーベルトを超えず、かつ一年間に付き50ミリシーベルトを超えないようにしなければならない。

労働安全衛生法施行令 別表第二 **放射線業務** (第六条、第二十一条、第二十二条関係)

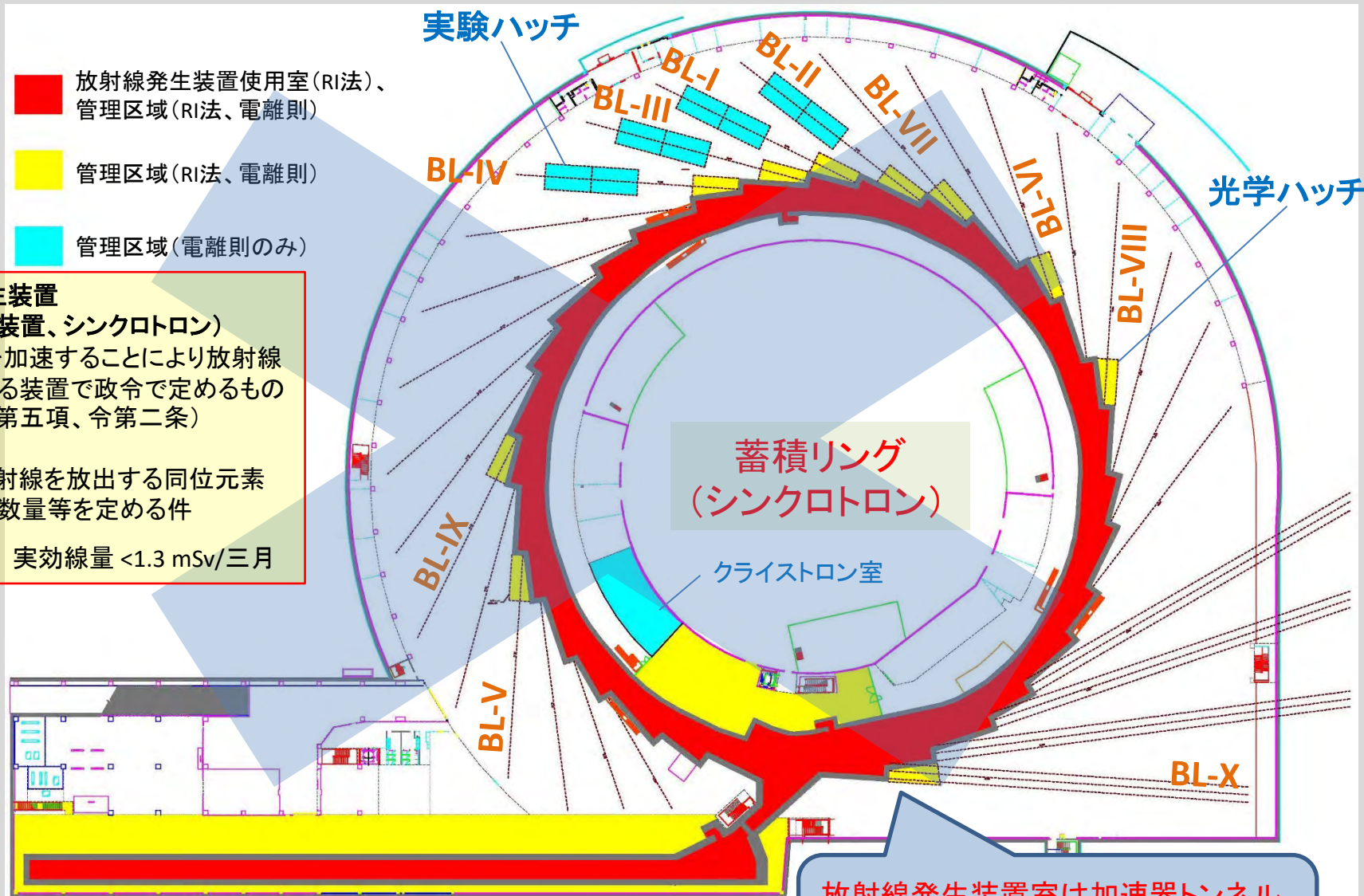
- 一 **エックス線装置の使用又はエックス線の発生を伴う**当該装置の検査の業務
- 二 サイクロトロン、ベータトロンその他の**荷電粒子を加速する装置の使用又は電離放射線(略)の発生を伴う**当該装置の検査の業務

● 放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則

(用語の定義)

第一条

八 放射線業務従事者 放射性同位元素等又は**放射線発生装置**の取扱い、管理又はこれに付随する業務(以下「**取扱等業務**」という。)に従事する者であつて、**管理区域に立ち入るもの**



1. 加速器と一体である（真空がつながっている）部分は、放射線発生装置の一部と見なす。ビームラインがベリリウム窓等で区切られている場合はそこまで、無い場合はビームライン末端までが放射線発生装置である。
2. 「表面から10cm離れた位置における線量当量率600nSv/h以下」という法令における条件が、装置の一部だけではなく装置全体で満たされなければ、その装置を放射線発生装置から除くことはできない。
3. 実験ホールは放射線発生装置使用室であり、その出入口には自動運転表示が必要。
4. 加速器室（放射線発生装置本体室）にはインターロックが必要。
5. 実験ホールを非管理区域とするならば、出入口にインターロックは必要ない。
6. 実験ステーションの頻繁な交換などを想定するなら、放射線発生装置の使用方法や使用目的の書き方を工夫すべき。ただし申請の際は、放射線発生装置は実態（形）のあるものでないとならない。
7. エックス線装置と分けずに、放射線発生装置で一元的にRI法の下管理すべきである。光学ハッチから下流を電離則で管理するとなると、かえって煩雑となる（労基署の監視が厳しくなるのではないか）。

- 放射線を放出する同位元素の数量等を定める件（平成十二年十月二十三日号外 科学技術庁告示第五号）

－（管理区域に係る線量等）第四条

- 放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則第一条第一号に規定する管理区域に係る外部放射線に係る線量、・・・は、次のとおりとする。
 - 一 外部放射線に係る線量については、実効線量が三月間につき一・三ミリシーベルト

－（診療上の被ばくの除外等）第二十四条

- 第四条から・・・の規定については、線量、実効線量又は等価線量を算定する場合には、一メガ電子ボルト未満のエネルギーを有する電子線及びエックス線による被ばくを含め、・・・算出するものとする。

告示第二十四条において線量等算定の際にはエックス線の被ばくも含むとしていることから、放射線発生装置（シンクロトロン）から発生した放射線が1 MeV以下の実験ハッチも告示、従ってRI法の適用範囲と考える。

● 放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則

(使用施設の基準)

第十四条の七

六 放射線発生装置の使用をする室の出入口で人が通常出入りするものには、放射性同位元素又は放射線発生装置の使用をする場合にその旨を自動的に表示する装置を設けること。

七 放射線発生装置の使用をする室の出入口で人が通常出入りするものには、放射性同位元素又は放射線発生装置の使用をする場合にその室に人がみだりに入ること防止するインターロックを設けること。

九 放射線発生装置の使用をする室には、別表第一に定めるところにより、標識を付すること。

6 第一項第七号の規定は、放射性同位元素又は放射線発生装置の使用をする室内において人が被ばくするおそれのある線量が同項第三号イに掲げる線量についての線量限度以下となるように遮蔽壁その他の遮蔽物が設けられている場合には、適用しない。

実験ホールは放射線発生装置を使用する室であるが、線量限度以下となる区域は、管理区域やインターロックの適用を要しない。

・ 次世代放射光施設放射線安全性検討委員会（技術面のレビュー）

委員長：渡部浩司 教授（東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター長）

委員長代理：上菟義朋 理事（日本アイソトープ協会 常務理事）

委員： J-PARC、SPRING-8、理研、あいichiSR、KEK、PhoSIC、東北大学、QSTの有識者
(2020年8月～2023年6月に計5回実施)

・ 原子力規制庁、労働基準監督署（コンプライアンス面のレビュー）

労基署：2022年6月～12月に計3回ヒアリング実施

規制庁：2019年6月～2023年6月に計8回ヒアリング実施

- 
- 実験ホールの非管理区域化は法令基準（1.3 mSv/3月）を満たせば可
 - 放射光ビームライン（BL）も放射線発生装置の一部でRI法教育訓練の対象

放射光ユーザー： 実験ハッチ又はBL装置内のみ放射光使用、実験ホールを非管理区域にすると
管理区域外において放射性発生装置の取扱いに従事する者
(要：教育訓練、不要：健康診断、被ばく管理)

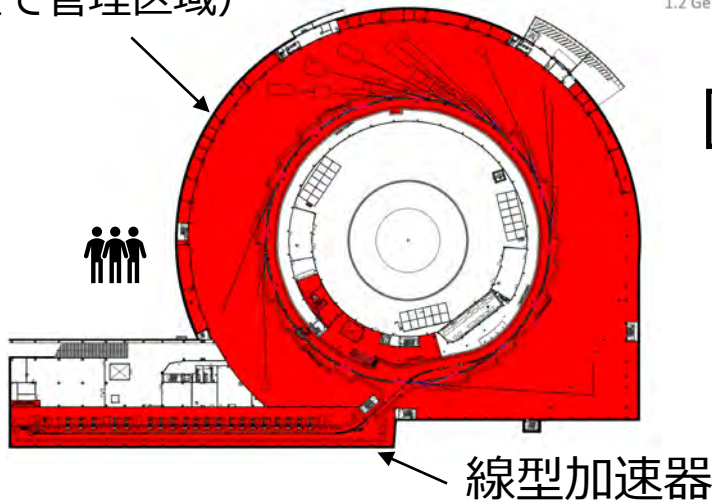
放射線業務従事者（要：教育訓練、健康診断、被ばく管理）

NanoTerasuでは実験ハッチ扉を開閉する実験代表者等が該当

既存の放射光施設
(全国9施設)

■ : 放射線管理区域

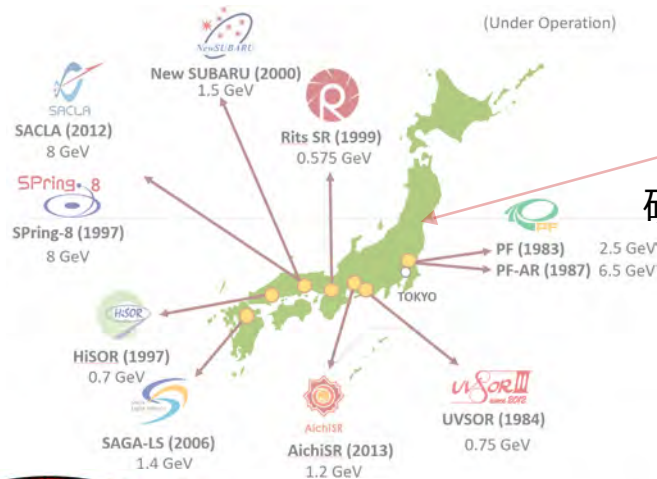
実験ホール
(全て管理区域)



全てのユーザーに従事者登録が必要

- 一般企業には参入の大きな障壁
- 軟X線ユーザーには過剰な放射線管理
(教育訓練・電離健康診断・被ばく管理)

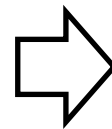
放射線管理区域内での発生装置取扱



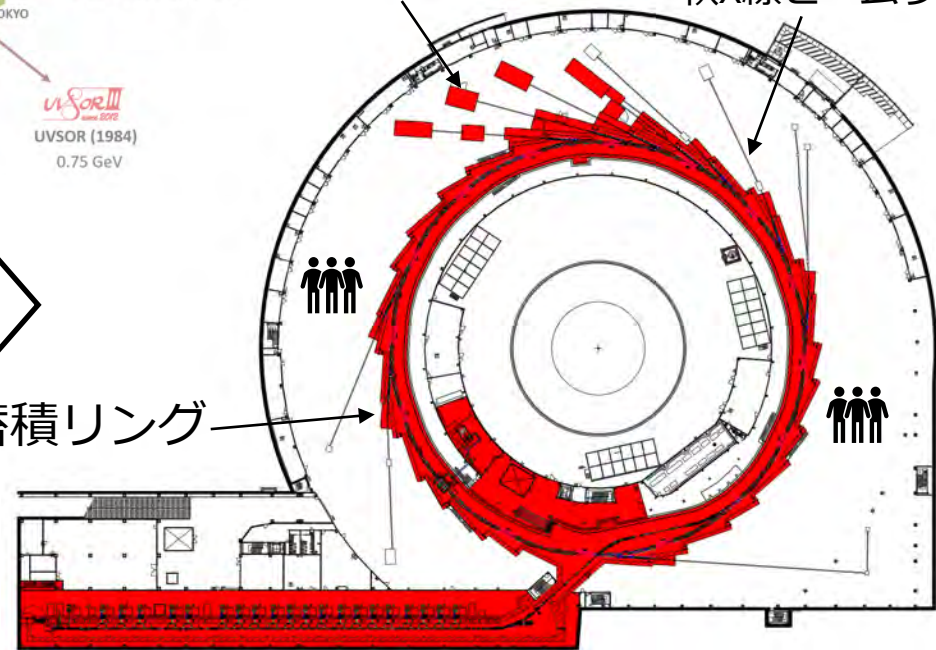
NanoTerasu

硬X線ビームライン
(実験ハッチ)

軟X線ビームライン



蓄積リング



実験ホールの大部分を管理区域から除外

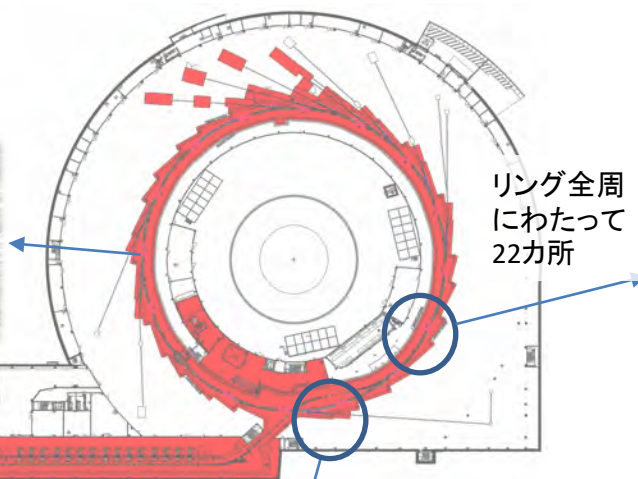
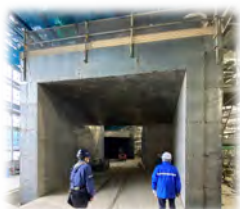
- 使いやすい研究施設⇒国際競争力の確保
- 新規ユーザーの参入⇒イノベーションの創出
- 法定教育の受講だけで利用可

放射線管理区域外での発生装置取扱

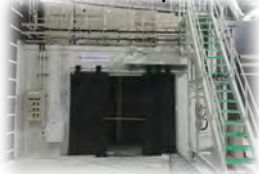
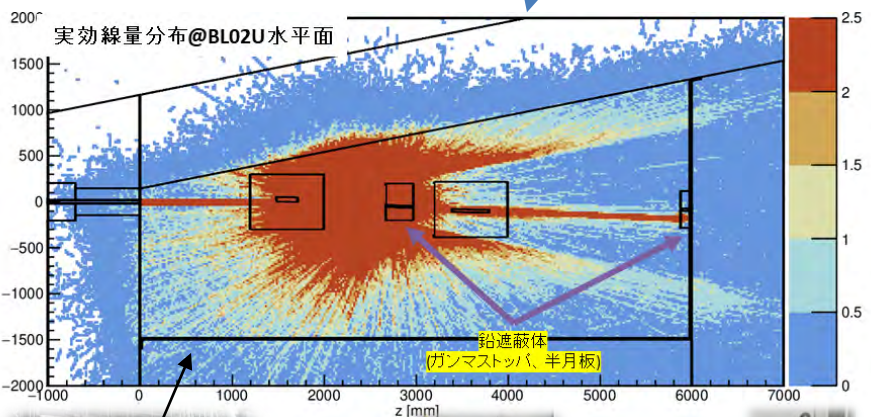
3.5. 遮蔽設計と設置例 (リングトンネル、光学ハッチ)

実験ホールの空間線量を抑えるため、
線種 (中性子、光子) に応じた適切な遮蔽を配置

リングトンネル
(コンクリート
80~100cm厚)



光学ハッチ、実験ハッチ合わせて20カ所



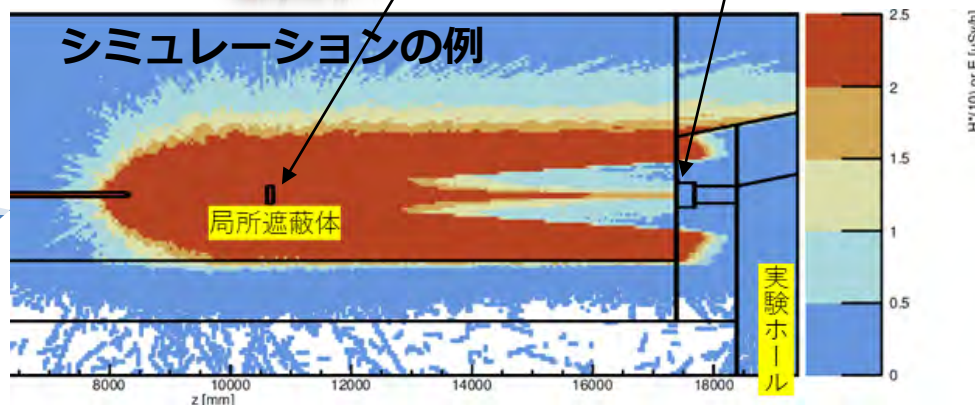
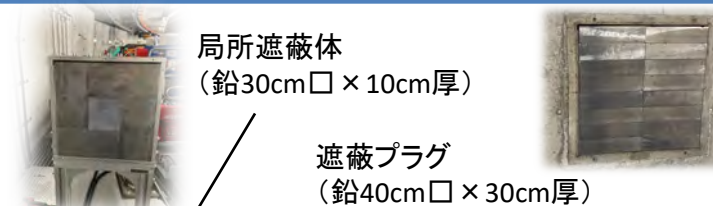
光学ハッチ
(鉛1cm厚)



ガンマストップパ
(鉛30cm厚)



半月板
(鉛10cm厚)

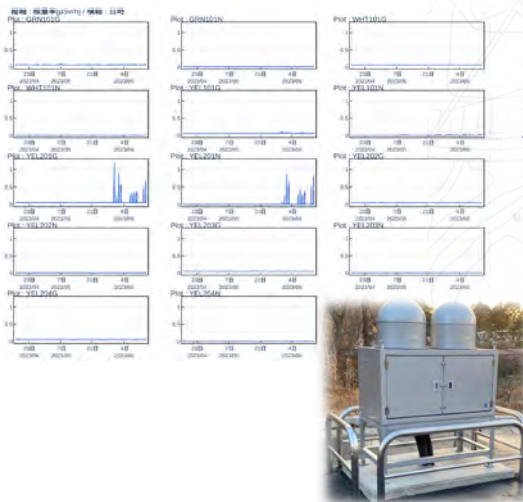


遮へい設計 (法令基準値に対して安全係数 2)
QST研究報告書(QST-R-23, QST-R-27)

- 1) 既存施設の実測に基づく評価
- 確認が容易、審査期間の短縮
- 2) 最新のシミュレーション技術*
- 計算時間大
- 隙間からの漏えいの確認
- 遮蔽が弱い場所の特定

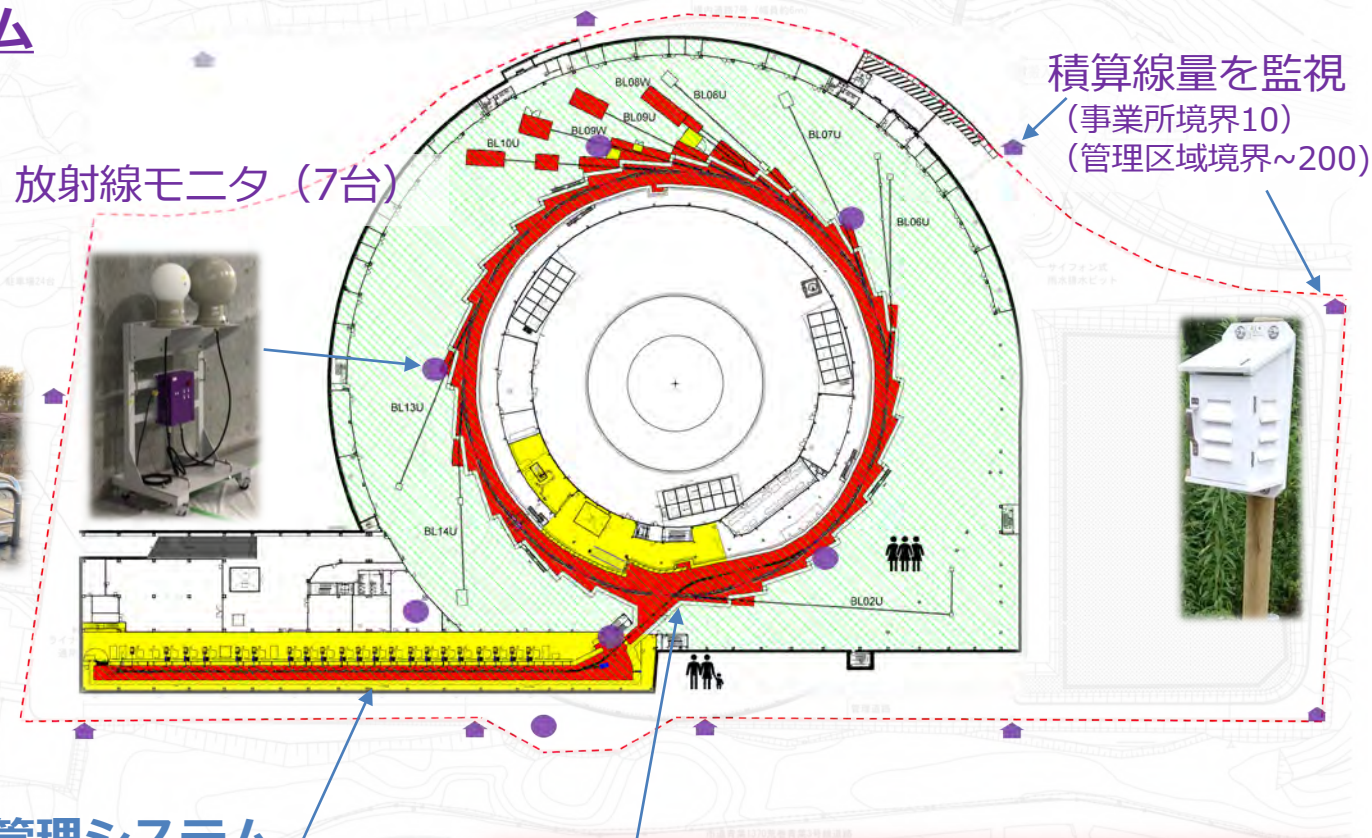
*T. Sato, et al, J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 684-690 (2018)

放射線集中監視システム



空間線量を集中監視
 $>2.5\mu\text{Sv/h}$ で
 インタロックにより
 加速器停止

放射線モニタ (7台)

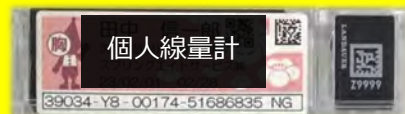


積算線量を監視
 (事業所境界10)
 (管理区域境界~200)

放射線管理区域入退管理システム

一般管理区域

1) 個人認証による扉開錠



線量計のQRコードによる個人認証



QRコードリーダー

インタロック区域

1) 退避確認

退避確認を実施し、インタロック区域区域内に人がいないことを確認後、扉閉鎖し運転許可

2) 個人鍵

インタロック区域には個人鍵を所持して入域し安全を確保

自動運転表示装置



退避確認
ボタン



個人鍵システム

エリア管理

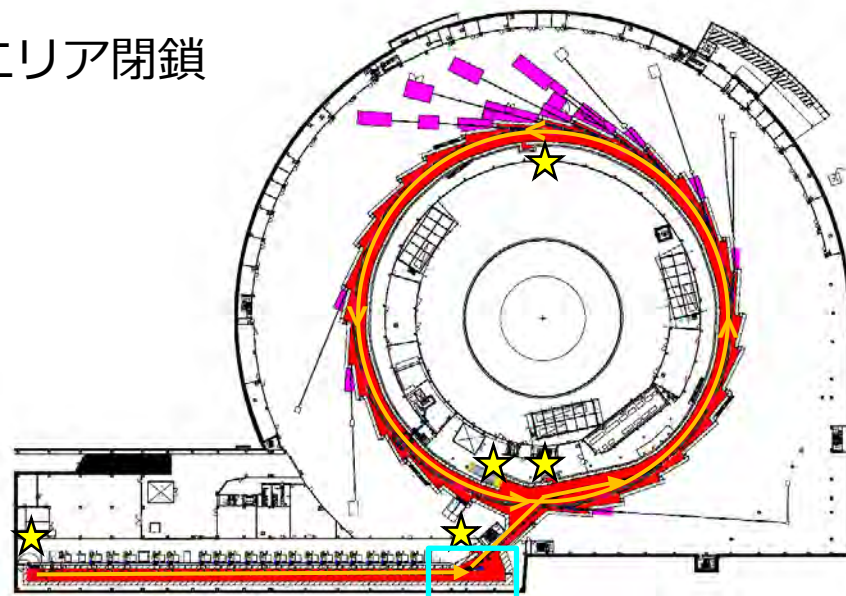
運転前に退避確認によって人払いをしてからエリア閉鎖

ライナック、リングトンネル

インターロックによってトンネルの
出入口扉★を閉鎖

光学ハッチ及び実験ハッチ

放射光導入時インターロックによって
当該区域の出入口扉を閉鎖



ライナックと蓄積リング のエリア切り離し

電子ビーム輸送に係る
偏向電磁石（LS電磁石）
および放射線シャッター
（LSシャッター）の状態
によって、各加速器の単
独運転が可能。



・ 運転時立入禁止区域

(Li, SRトンネル、ハッチ)

退避確認を実施し、エリア内に人がいないことを確認後、扉閉鎖

▲退避確認ボタン

退避確認経路

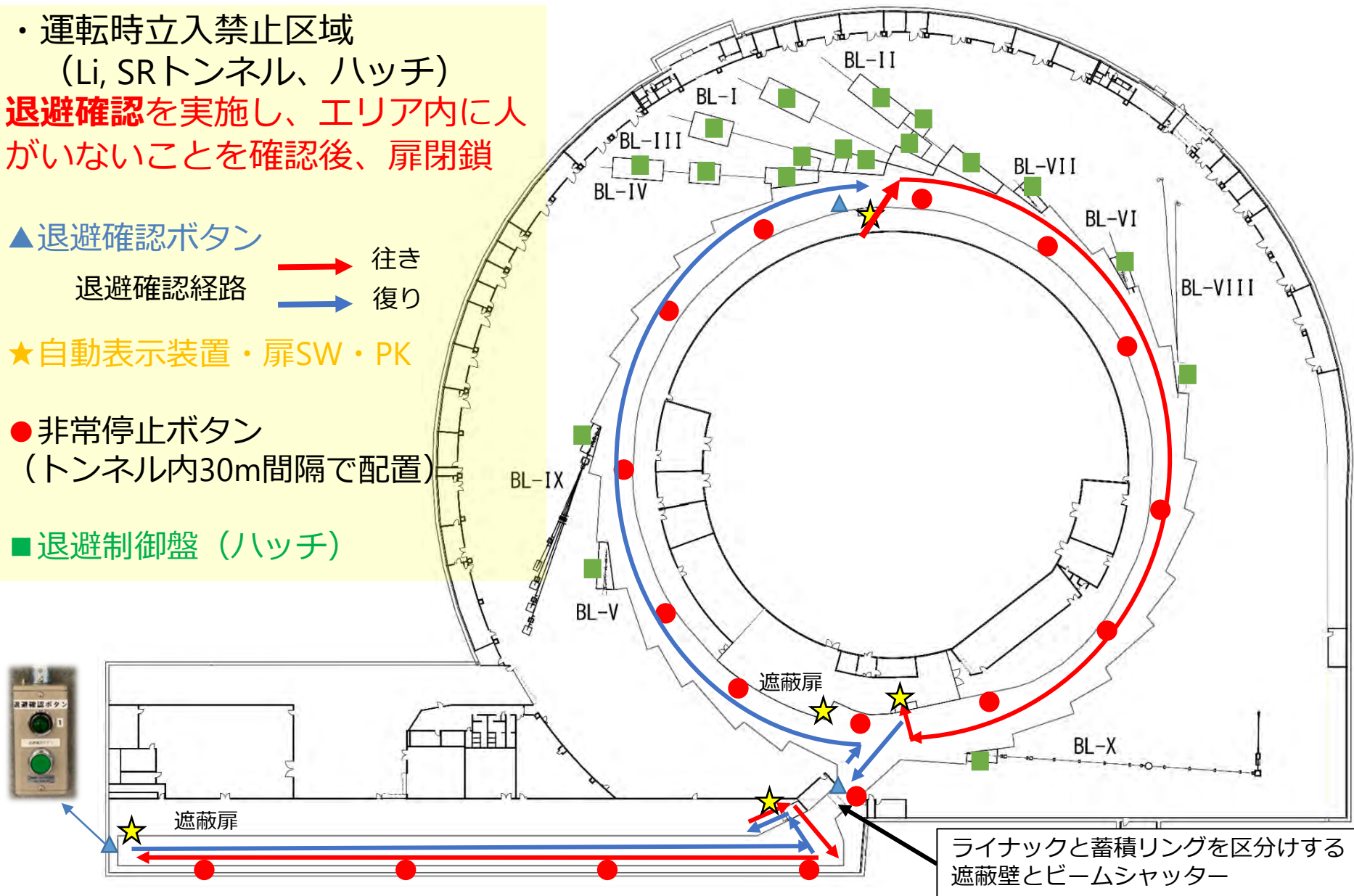
→ 行き
→ 復り

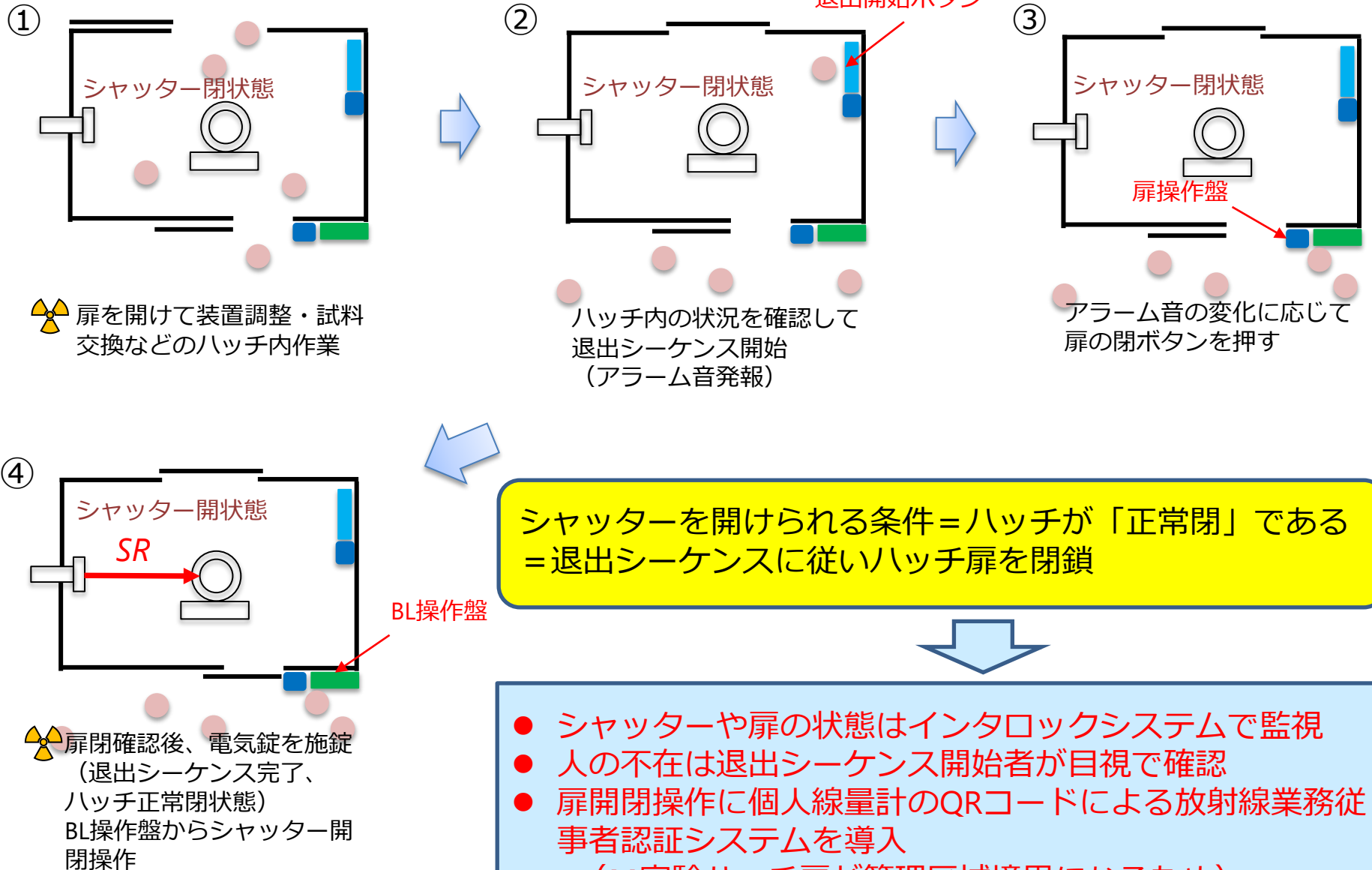
★自動表示装置・扉SW・PK

●非常停止ボタン

(トンネル内30m間隔で配置)

■退避制御盤 (ハッチ)





従事者等の区分	定義、対象者	備考
放射線業務従事者 (要：教育訓練、 健康診断、 線量管理) Web手続き	放射線発生装置の取扱い、管理又は これに付随する業務の従事者であっ て管理区域に立ち入るもの -管理区域扉の開閉が可能 -シャッターの操作が可能	加速器運転保守、 BL運転保守、 実験ハッチに立ち入 るBL利用者 一時立入者の引率
取扱等業務従事者 (要：教育訓練) e-learning Web手続き	放射線発生装置の取扱い、管理又は これに付随する業務の従事者であっ て管理区域に立ち入らないもの -管理区域外からシャッターの操作 が可能	実験ハッチに立ち入 らないBL利用者、 (軟X線BL利用者) 放射線業務従事者の 引率により管理区域 への一時立入可
一時立入者 (要：線量管理、 ただし、被ばくのお それがない場合 は不要)	管理区域に一時的に立ち入る者で あって放射線業務従事者でないもの、 見学者等 -シャッターの操作不可	管理区域の立ち入り には放射線業務従事 者の引率が必要

- 2022年**
- 3/28 使用許可申請書の提出
 - (7/1 理事交代に伴い補正申請)
 - (9/5 則第22条の3適用区域の追加と記載適正化等における補正申請)

10/7 使用許可

12/22 労基署への届出

2023年

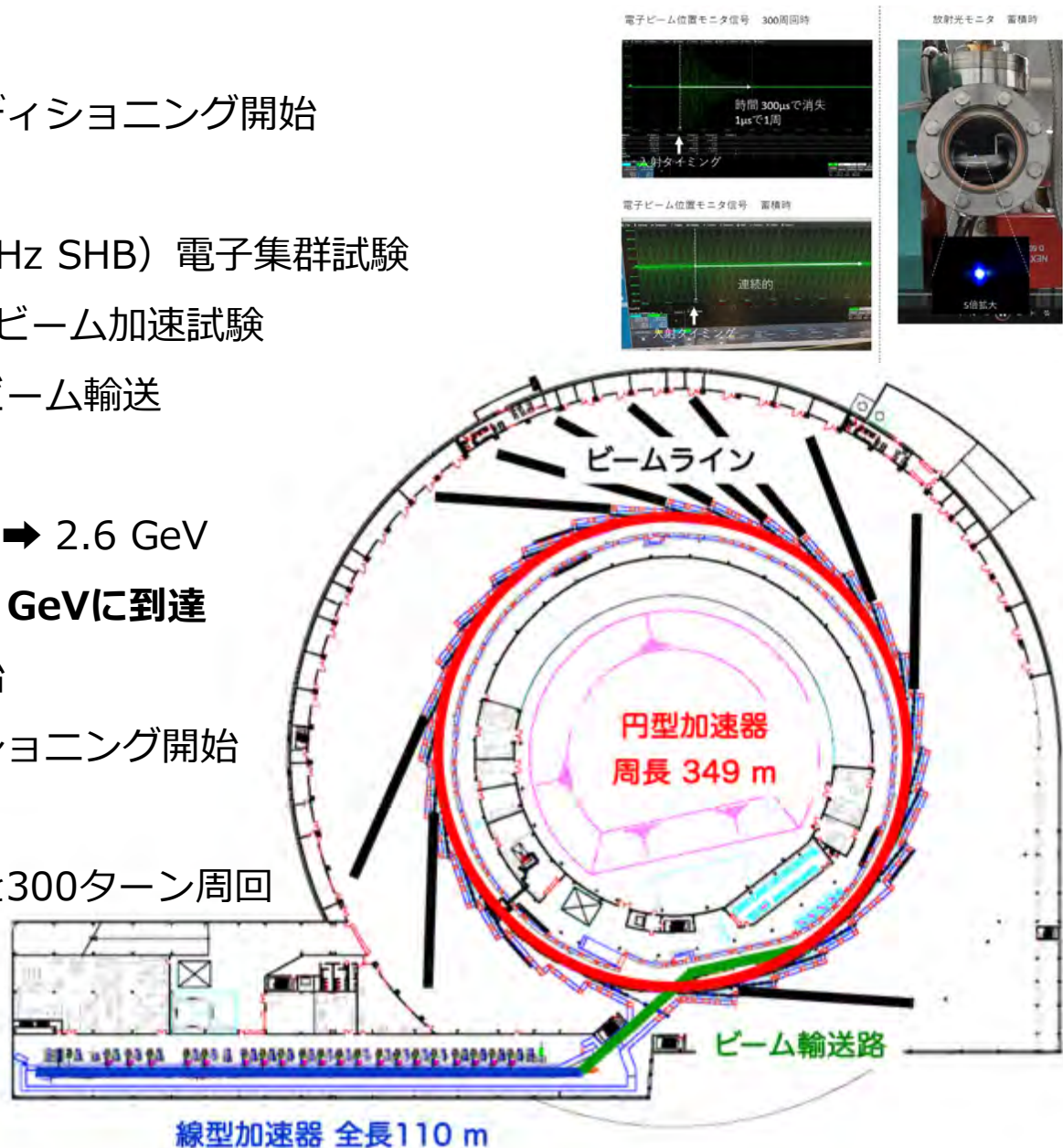
- 2/1 放射線障害予防規程の施行 (2/3 届出)
- 放射線取扱主任者指名 (2/3 届出)
- 4/1 放射線障害予防規程細則、放射線安全手引き制定
- 4/17 運転前の施設検査 (遮へい、インタロック、標識)**
- ライナック、蓄積リング (MBS閉とし放射光ビームラインを除く)
- 6/19 ライナック運転時の施設検査 (放射線測定) → 6/20付合格**
- 7/24 変更許可申請 (SR出射電荷数を3倍増+管理区域拡大) → 11/17付許可**
- 11/29 放射光ビームライン運転前検査 (遮へい体、インターロック、標識)
- 12/7 BL調整運転において放射光の確認 (ファーストビーム)

2024年

- 3/15 蓄積リング (放射光ビームライン含む) 運転時検査 (放射線測定)

2023年

- 2/13 ライナック空洞コンディショニング開始
- 4/18 電子銃調整
- 4/19 バンチング部 (476MHz SHB) 電子集群試験
- 4/20 Sバンド加速管によるビーム加速試験
- 4/24 ライナック出口までビーム輸送
- 4/26 加速エネルギー測定
1.6 GeV ➡ 2.2 GeV ➡ 2.6 GeV
- 4/27 ビームエネルギーが3 GeVに到達**
- 5/29 ビーム輸送路調整開始
- 6/2 リング空洞コンディショニング開始
- 6/2 入射部調整開始
- 6/8 電子ビームがリングを300ターン周回
- 6/16 **0.1mAの蓄積を達成**
- 8/10 **100mAの蓄積を達成**



次世代放射光施設（NanoTerasu）放射線安全取扱手引

2.1 放射線管理区域と標識

第 2.1 表 放射線管理区域と標識

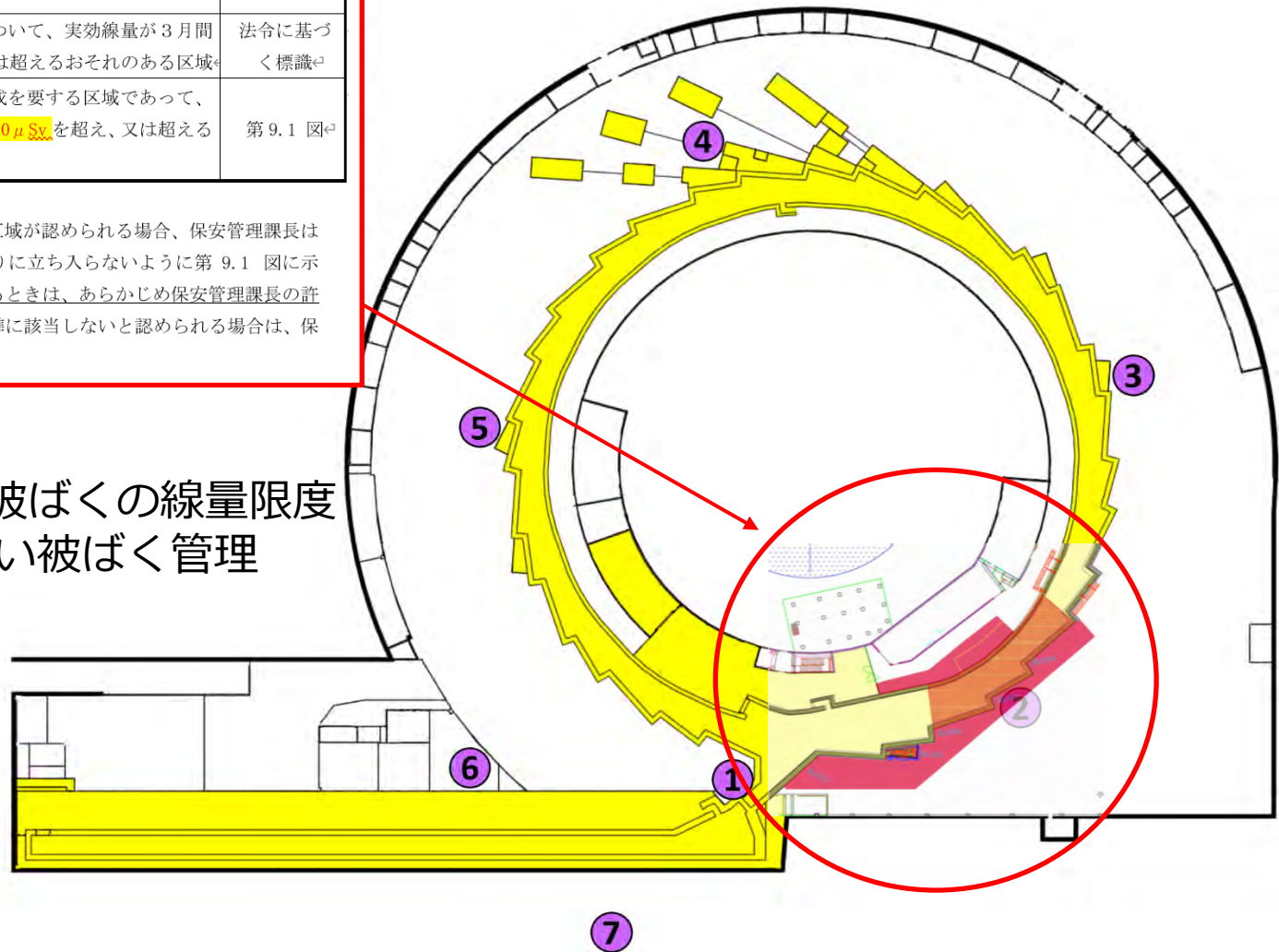
区 域	定 義	標 識
放射線管理区域*	外部放射線に係る線量について、実効線量が 3 月間につき 1.3mSv を超え、又は超えるおそれのある区域	法令に基づく標識
警 戒 区 域 注 1)	放射線管理区域周辺の警戒を要する区域であって、実効線量が 1 週間につき 20 μ Sv を超え、又は超えるおそれのある区域	第 9.1 図

第 2.1 表に示す警戒区域の基準に該当する区域が認められる場合、保安管理課長は当該区域を警戒区域に指定し、他の者がみだりに立ち入らないように第 9.1 図に示す標識等を設ける。なお、警戒区域に立ち入るときは、あらかじめ保安管理課長の許可を受ける。また、当該区域が警戒区域の基準に該当しないと認められる場合は、保安管理課長は警戒区域を解除できる。

ICRP 勧告による公衆被ばくの線量限度（1 mSv/y）を超えない被ばく管理

6/6- 警戒区域設定 (>20 μ Sv/週)

SR入射部付近 赤塗部



NanoTerasuでは、放射線業務従事者でなくても、可能な限り放射光実験に参加できるように遮蔽、放射線安全設計を行い、実験ホールの非管理区域化を行った。

- ・ 2022/10/7 使用の許可
- ・ 4/17 運転前の施設検査（遮へい、インタロック、標識）
ライナック、蓄積リング（MBS閉とし放射光ビームラインを除く）
- ・ 6/19 ライナック運転時の施設検査（放射線測定）
→ 6/20付で合格
- ・ 3GeV電子加速、リング入射、蓄積に1ヶ月早く成功。
- ・ 蓄積リングについては、2024年3月に施設検査を受検する予定。
2024年度の運用開始に向けて、放射線測定を継続しながら加速器調整中

今のところ、遮へい設計や放射線安全システム上の大きな問題は確認されておらず、実験ホールにおいてICRP 勧告による公衆被ばくの線量限度（1 mSv/y）を超えない管理の見通しを得ている。